

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра промышленной океанологии и охраны природных вод

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему Исследование факторов формирования барботажа в мелком море

Исполнитель Березина Анфиса Владимировна

Руководитель к. г. н., доцент

Чанцев Валерий Юрьевич

«К защите допускаю»

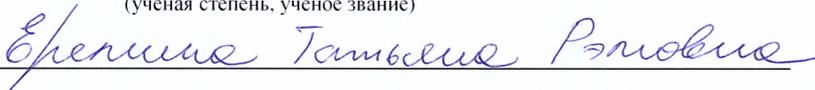
Заведующий кафедрой



(подпись)

к. ф. - н. н., доцент

(ученая степень, ученое звание)



(фамилия, имя, отчество)

«19» июня 2017г.

Санкт-Петербург

2017

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра промышленной океанологии и охраны природных вод

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему: Исследование факторов формирования барботажа в мелком море

Исполнитель Березина Анфиса Владимировна

Руководитель к. г. н., доцент

Чанцев Валерий Юрьевич

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

(подпись)

(учен

ая степень, ученое звание)

(фамилия, имя, отчество)

«__» _____ 20__ г.

Санкт–Петербург

2017

Оглавление

Введение.....	4
1. Методы разрушения льда.....	6
1.1 Разрушение льда портовыми ледокольными буксирами.....	6
1.2 Барботажные системы для предотвращения нарастания льда.....	7
1.3 Сток отработанных вод.....	8
1.4 Потокобразователи.....	8
2. Барботажные установки для борьбы с нарастанием льда.....	10
2.1 Опыт эксплуатации барботажных установок в Канадской Арктике.	10
2.2 Численное моделирование для задачи о топчении льда с использованием барботажа.....	11
2.3 Экспериментальное исследование барботажа в Гренландии.....	12
3. Исследование параметров барботажа.....	15
3.1 Постановка задачи.....	15
3.2 Математический аппарат теории размерностей и подобия.....	16
3.3 Анализ размерностей.....	18
3.4 Разработка установки для исследования параметров барботажа и постановка лабораторного эксперимента.....	25
3.5 Результаты исследования для одиночного пузырька.....	28
3.6 Результаты исследования для потока пузырей при расходе воздуха 0,06 – 0,6 л/мин.....	32
3.7 Результаты исследования для потоков воздуха при расходах 5 – 12,5 л/мин.	39

Заключение	45
Список литературы	47

Введение

В настоящее время идет активное освоение морей российской Арктики, в частности, строятся и проектируются порты на Карском море и море Лаптевых. Эти порты создаются с целью обеспечения добычи и транспортировки углеводородов, что приведет к увеличению грузооборота. Для этого необходимо обеспечить круглогодичную навигацию. Одной из актуальных проблем для навигации в портах замерзающих морей является нарастание льда.

Для разрушения льда на портовых акваториях применяются различные методы. Традиционным способом разрушения льда для проводки судов являются ледоколы. Для борьбы с нарастанием льда могут использоваться отработанные воды охладительных систем, а для удаления льдин от портовых сооружений применяются потокообразователи. Одним из способов предотвращения нарастания льда на портовой акватории, особенно вблизи причалов, является установка барботажной системы.

Система состоит из труб с отверстиями, проложенных по морскому дну и присоединенных к воздушному компрессору, располагающемуся на берегу. С помощью компрессора воздух продавливается по трубам и выходит через отверстия в виде пузырьков. Этот процесс называют барботажем. Вместе с потоком пузырей более теплые воды нижнего слоя поднимаются к поверхности. Турбулентность в воде и поступление тепловой энергии подавляют формирование ледяного покрова.

Реализация такой системы требует определения ряда параметров барботажа. Этой теме посвящен ряд работ зарубежных и отечественных исследователей [2, 6, 7, 8], однако, в них выводы делаются только на основании эмпирических данных для конкретных акваторий.

Для оценки эффективности применения барботирования в тех или иных условиях требуется универсальное теоретическое описание определяющих его факторов.

Цель работы: на основе теории размерностей и лабораторного эксперимента определить и математически описать основные параметры барботажа в мелком море.

Задачи работы:

1. Собрать экспериментальную установку для исследования параметров барботажа;
2. Сформировать массив данных по результатам наблюдений в ходе эксперимента;
3. На основании теории размерностей получить выражения для определения параметров барботажа.
4. Выполнить расчет и проанализировать характеристики всплытия воздушных пузырей

1. Методы разрушения льда

Для борьбы с нарастанием льда и его разрушением в портовых гаванях в настоящее время применяются различные технические средства. Их выбор определяется региональными особенностями гидрологического режима акватории. Рассмотрим основные методы, применяющиеся для предотвращения образования льда и разрушения.

1.1 Разрушение льда портовыми ледокольными буксирами

Наиболее распространенным методом для разрушения льда является применение портовых буксиров. Они характеризуются большей мощностью, по сравнению с неледокольными буксирами.

Государственные ледоколы обеспечивают навигацию в территориальных водах, иногда на достаточно больших расстояниях. В среднем, например, для шведских портов, ледоколам необходимо разрушать лед в каналах длиной около 8,5 морских миль. Разрушение льда на таких больших расстояниях возможно только при помощи ледоколов. Не существует другой такой технологии настолько же эффективной или экономичной, однако, существует ряд проблем, связанных с его применением.

Дополнительное время, необходимое для проводки судна в порт, зависит от ледовой обстановки и собственной мощности судна. Если в нормальные зимы это время незначительно, то в суровые оно может быть существенным. Потери времени происходят обычно не в ледовом канале, а на месте стоянки судна или у причала, где льдины скапливаются между сооружениями и судами. Высокое давление и нагрузки могут привести к повреждениям как судна, так и портового сооружения. Вместе с тем, наиболее сложным является разрушение

льда и его удаление вблизи причала. Поэтому в данном случае целесообразно включать в организацию контроля льда и другие методы.

Ледокольные буксиры поддерживают свободным ото льда не только ледовый канал до прибытия или отправления судна, но и места для разворота судов, а также максимально возможно очищают места швартовки и зоны у причалов. Во время стоянки судна ледокол взламывает льдины, скопившиеся между судном и причалом для увеличения маневрирования.

Ледовый канал может замерзнуть при отсутствии регулярного трафика и прохождения ледоколов. При этом, когда разрушенный в канале лед смерзается, разрушить его вновь может оказаться труднее, чем проложить новый канал.

Можно выделить три категории проблем, связанных с использованием ледокольных буксиров:

1. Износ и устаревание. Часто ледокольные буксиры используются более 40 лет, и они уже не отвечают современным требованиям, а на закупку новых у портов не хватает средств.
2. Комплектование состава буксира. Необходим подбор опытных и квалифицированных сотрудников.
3. Возрастание числа судов, принимаемых в портах, в то время как ледокольный флот не расширяется и устаревает [7]

1.2 Барботажные системы для предотвращения нарастания льда

Барботажные системы, в основном, применяются для того, чтобы поддерживать доки и сооружения в гавани свободными ото льда, замедляя его нарастание путем увеличения теплоотдачи от нижних водных слоев. Вода поднимается к поверхности вместе с потоком воздушных пузырьков. Создаваемая турбулентность и поступление тепловой энергии подавляет образование льда.

Система состоит из труб с отверстиями, которые устанавливаются на морское дно и соединяются с воздушным компрессором на берегу. Через компрессор воздух нагнетается в воду, при этом давление в компрессоре используется для преодоления гидростатического давления и потерь при трении, поэтому его величина зависит от глубины, на которую помещается труба. Для эффективного использования такой системы необходимо, чтобы придонная вода была максимально теплой. Однако, во многих мелководных заливах температура нижних слоев никогда не бывает 4°C и держится на отметке около $0,1 - 0,2^{\circ}$ выше точки замерзания. Поэтому целесообразность таких установок следует оценивать исходя из локальных особенностей каждой акватории. Помимо этого, можно отметить, что закрепленные на дне трубы чувствительны к повреждениям. [2, 7]

1.3 Сток отработанных вод

Так как многие порты используются для нужд промышленности иногда доступны сточные воды с охладительных систем, которые не всегда используются. Теплые воды могут быть сброшены на необходимом участке акватории, где уже с помощью барботажных систем и диффузионных аппаратов можно расширить их распространение. Наиболее эффективен сток теплых вод с температурой чуть выше точки замерзания. При небольшой солености воды, теплые сточные воды с температурой выше 10°C из-за охлаждения станут тяжелее, чем прилегающие воды и опустятся вниз.

При использовании такого метода возникает проблема теплопотери в воде, не покрытой льдом, что приводит к туманам и образованию льда на оборудовании. Поэтому в идеальном случае, сток теплых вод должен позволять нарастать тонкому ледяному покрову, который может быть с легкостью разрушен ледокольным буксиром. [7]

1.4 Потокобразователи

Ускорители, образующие течение на определенном участке акватории, называемые потокообразователями, используются, чтобы переместить или придать направление льдинам подальше от портовых сооружений. Наиболее распространенными являются пропеллерные системы. Установка такой системы позволяет поддерживать небольшой участок вблизи пристани свободной ото льдин. Фотография потокообразователя представлена на рисунке 1.1. [7]



Рисунок 1.1 Общий вид потокообразователя

2. Барботажные установки для борьбы с нарастанием льда

Целесообразность использования барботажных систем для предотвращения образования и топления льда и опыт их эксплуатации описывается в работах [6, 8, 9].

2.1 Опыт эксплуатации барботажных установок в Канадской Арктике.

Автором работы [9] даны практические рекомендации по проектированию барботажных систем для топления льда.

Схема барботажа представлена на рисунке 2.1.

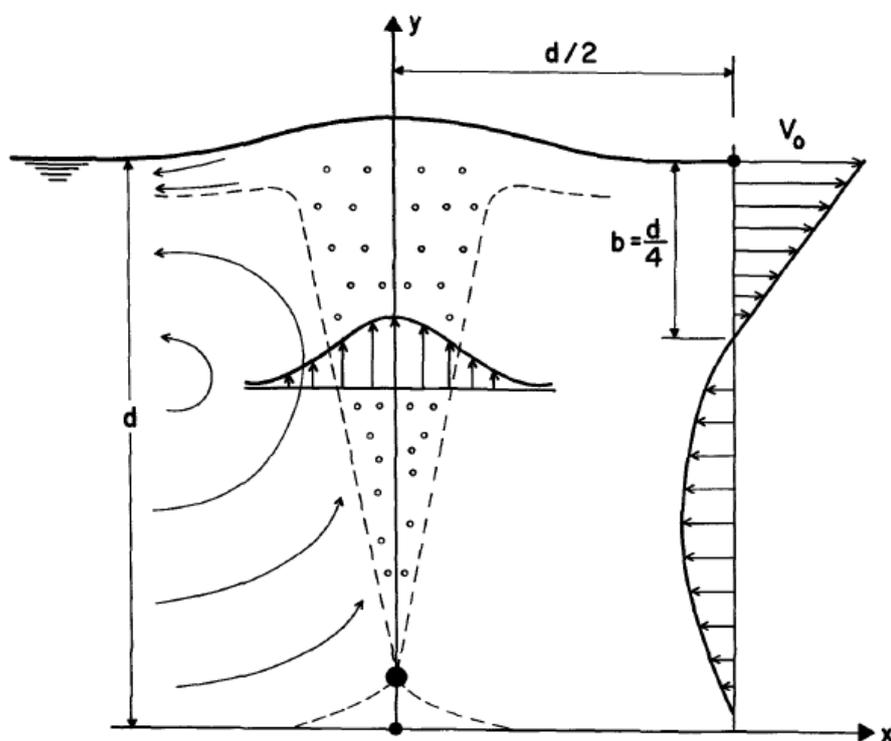


Рисунок 2.1 Схема циркуляции воды при барботаже и профиль горизонтальной скорости течения

Максимум горизонтальной скорости V_0 отмечается приблизительно на расстоянии $x = d/2$. Здесь d – глубина места. В исследовании также говорится, что размер отверстия барботера мало влияет на максимальную скорость течения.

Приводится выражение, позволяющее определить поток теплa через лед при барботаже.

$$\frac{qx}{k(T_1 - T_s)} = 0,94 \left(\frac{V_0 x}{\nu} \right)^{0,8} \left(\frac{b}{x} \right)^{0,4} \quad (2.1)$$

q – локальная величина теплового потока;

k – теплопроводность воды, вычисленная при температуре $\frac{1}{2}(T_1 + T_s)$;

T_1 – максимальная температура в области барботажа;

T_s – температура на поверхности воздушно-пузырьковой завесы;

ν – кинематическая вязкость воды;

2.2 Численное моделирование для задачи о топении льда с использованием барботажа

В работе [8] для определения эффективности барботажных систем, устанавливаемых в целях предотвращения образования льда, используется численный метод теплопереноса. Для процессов нарастания и таяния льда применялись эмпирические модели результаты которых использовались в численных решениях.

По результатам расчетов установлено, что барботрование приводит к возникновению циркуляции воды вблизи стенки причала. Если водная масса

имеет температуру, близкую к точке замерзания, большое количество тепловой энергии вовлекается в топление льда вблизи причала. Делается вывод о достаточно высокой эффективности барботирования в северных морях, в районах, где в зимнее время высвобождается геотермальная тепловая энергия, вовлекаемая в циркуляцию воды.

2.3 Экспериментальное исследование барботажа в Гренландии

В работе [6] приводятся результаты экспериментальных полевых исследований в одном из Гренландских заливов.

Исследование проводилось в Colonybay вблизи Narssaq. В ходе полевых исследований, предваряющих экспериментальные, было установлено следующие особенности, присущие водам залива. Вода с наименьшей соленостью располагается на поверхности, и несмотря на то, что удельный вес поверхностных вод меньше, чем нижележащего слоя, естественной тенденции к перемешиванию воды не выявлено. Было сделано предположение о том, что стимуляция перемешивания и, таким образом, предотвращение образования тонкого устойчивого поверхностного слоя, который может быть с легкостью охлажден до температуры ниже точки кристаллизации, приведет к замедлению формирования ледяного покрова. Чтобы проверить данную гипотезу были проведены экспериментальные исследования, в которых перемешивание создавалось за счет барботирования толщи воды.

Схема залива и расположение элементов барботажной системы показаны на рисунке 2.1.

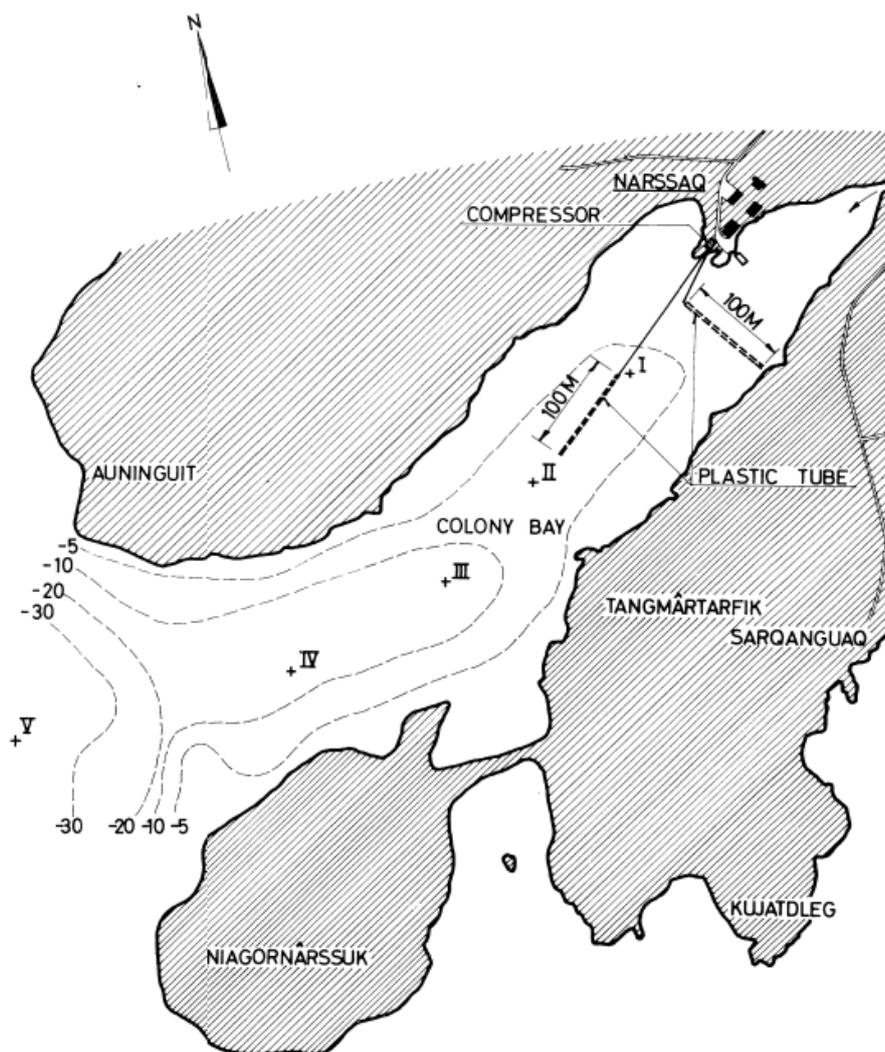


Рисунок 2.2 Схема района проведения эксперимента и расположения элементов барботажной системы

На рисунке 2.2 представлена схема барботажной установки, использовавшейся в эксперименте.

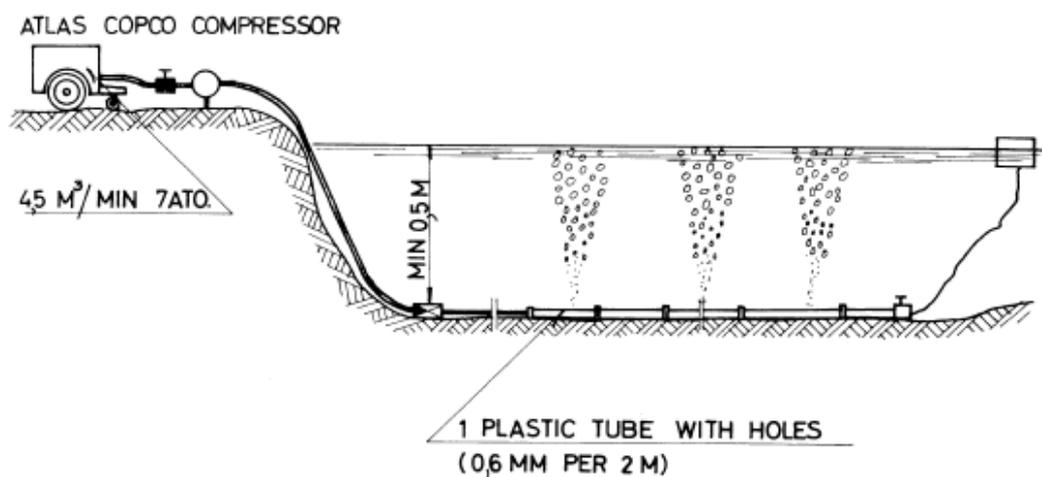


Рисунок 2.3 Схема барботажной установки

Две пластиковые трубы с отверстиями 0,6 мм через каждые 2 метра были помещены на дно в кутовой части залива. Воздух нагнетался по трубам с помощью стандартного компрессора расходом 4,5 м³/мин.

В течение периодов с относительно легкой ледовой обстановкой в ледовом покрове формировались полыньи с диаметром 1 – 1,5 м над каждым отверстием в трубе. При понижении температуры до -10°С полыньи сузились до 0,5 м в диаметре, в некоторых случаях даже затянулись. Тем не менее, было ясно, что толщина льда над трубами была значительно меньше, чем в любой другой части залива.

Таким образом, эксперимент, который вовсе не был нацелен на поддержание свободным ото льда акваторию залива, а предназначался, чтобы исследовать возможности метода барботажа, показал значительное улучшение ледовой обстановки. Поэтому, можно сделать вывод, что при большом трафике судов в порту барботажные системы могут обеспечить приемлемые ледовые условия для навигации в зимний период.

3. Исследование параметров барботажа

3.1 Постановка задачи

Диаметр отрыва пузыря от сопла является важнейшим параметром при барботаже. Также для создания барботажной установки необходимо иметь данные о частоте отрыва пузырей от сопла. Для этого требуется определить их взаимосвязь с расходом воздуха и диаметром сопла, которые мы можем задавать при проектировании барботера.

Решение данной задачи возможно при помощи метода лабораторного эксперимента и анализа его результатов на основе теории размерностей.

Для этого необходимо разработать лабораторную установку для проведения серии экспериментов с подачей воздуха через сопла различного диаметра. Также требуется провести серии экспериментов, задавая различный объемный расход воздуха. Это позволит установить связь отрывного диаметра пузыря от диаметра сопла и расхода. В ходе эксперимента также следует регистрировать частоту отрыва пузырьков, чтобы учесть ее при дальнейшем математическом описании процесса.

После обработки полученных данных появляется возможность вывести теоретическое соотношение для частоты отрыва пузырьков, а также для их отрывного диаметра и подобрать эмпирические коэффициенты.

3.2 Математический аппарат теории размерностей и подобия

Основные понятия теории размерностей и подобия

Единицы измерения можно разделить на основные, которые задаются произвольно в виде тех или иных эталонов, и производные, которые получаются из основных в силу определения физической величины.

Система единиц измерения – это совокупность единиц измерения, достаточная для измерения характеристик рассматриваемого класса явлений.

Класс систем единиц измерения – это совокупность систем единиц измерения, которые отличаются только величиной основных единиц измерения. В классе систем единиц измерения MLT , к которому принадлежит СИ, основными единицами измерения являются

$$\frac{кг}{M}, \frac{м}{L}, \frac{с}{T}$$

где M, L, T — некоторые положительные числа, показывающие, во сколько раз уменьшаются основные единицы массы, длины, времени при переходе от исходной системы СИ к другой системе данного класса.

Размерность физической величины – это функция, определяющая, во сколько раз изменится численное значение этой величины при переходе от исходной системы единиц измерения к другой внутри данного класса.

Безразмерные величины – это величины, численное значение которых одинаково во всех системах единиц измерения внутри данного класса. Все остальные величины называются размерными.

Величины имеют независимую размерность, если размерность ни одной из этих величин нельзя представить в виде произведения степеней размерностей остальных величин.

Центральным утверждением анализа размерностей является П-теорема, которая формулируется следующим образом:

Зависимость некоторой размерной величины от размерных определяющих параметров можно представить в виде зависимости некоторой безразмерной величины от безразмерных комбинаций определяющих параметров, количество которых меньше общего числа определяющих параметров на число параметров с независимыми размерностями. [1]

Таким образом, если имеется некоторая физическая закономерность, которую можно записать в виде:

$$a = f(a_1, \dots, a_k, a_{k+1}, \dots, a_n) \quad (3.1)$$

a_1, \dots, a_n – определяющие параметры;

a_1, \dots, a_k – определяющие параметры, имеющие независимые размерности;

a_{k+1}, \dots, a_n – определяющие параметры, имеющие зависимые размерности, т.е. их размерность можно выразить через размерности a_1, \dots, a_k

Размерность определяемой величины a должна выражаться через размерности определяющих параметров:

$$[a] = [a_1]^{p_n}, \dots, [a_k]^{r_n} \quad (3.2)$$

Поэтому можно составить $n - k$ безразмерных комплексов:

$$\Pi_1 = \frac{a_{k+1}}{a_1^{p_{k+1}} \dots a_k^{r_{k+1}}}, \dots, \Pi_{n-k} = \frac{a_n}{a_1^{p_n} \dots a_k^{r_n}}$$

$$\Pi = \frac{a}{a_1^p \dots a_k^r} \quad (3.3)$$

Тогда зависимость (1) можно переписать в виде:

$$\Pi = F(a_1, \dots, a_k, \Pi_1, \dots, \Pi_{n-k}) \quad (3.4)$$

Можно перейти к такой системе единиц измерения, что любой из параметров a_1, \dots, a_k изменится в любое число раз, а остальные не изменятся, т.е. меняется только один аргумент. Тогда зависимость (4) представляется только через функцию $n - k$ безразмерных комплексов:

$$\Pi = \Phi(\Pi_1, \dots, \Pi_{n-k}) \quad (3.5)$$

3.3 Анализ размерностей

Перечислим параметры, которые могут влиять на диаметр отрыва воздушного пузыря от сопла D_B ($[D_B] = \text{м}$):

1. Диаметр сопла d , м
2. Плотность воды ρ_w , $\text{кг}/\text{м}^3$
3. Плотность воздуха ρ_a , $\text{кг}/\text{м}^3$
4. Объемный расход воздуха Q , $\text{м}^3/\text{с}$
5. Ускорение свободного падения g , $\text{м}/\text{с}^2$
6. Коэффициент поверхностного натяжения σ , $\text{кг}/\text{с}^2$

В данном случае число основных единиц измерения $z = 3$ – единицы длины, массы и времени.

Можно записать искомую функцию в виде:

$$D_B = f(d, \rho_w, \rho_a, Q, g, \sigma) \quad (3.6)$$

Число переменных в данной функции $n = 7$. В соответствии с Пироттеоремой найдем число безразмерных комплексов m :

$$m = n - z = 7 - 3 = 4 \quad (3.7)$$

Таким образом, можем записать:

$$\Pi = \varphi(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3) \quad (3.8)$$

Π, Π_1, Π_2, Π_3 – безразмерные комплексы.

Выберем три переменных с независимыми размерностями, которые включают в себя три основные единицы. Пусть это будут d, ρ_w и Q . Запишем их размерности и размерности остальных переменных в системе MLT.

$$[d] = L^1 M^0 T^0$$

$$[\rho_w] = L^{-3} M^1 T^0$$

$$[Q] = L^3 M^0 T^{-1}$$

$$[D_B] = L^1 M^0 T^0$$

$$[\rho_a] = L^{-3} M^1 T^0$$

$$[g] = L^1 M^0 T^{-2}$$

$$[\sigma] = L^0 M^1 T^{-2}$$

Найдем выражения для Π, Π_1, Π_2, Π_3 путем деления D_B, ρ_a, g, σ на произведение выбранных трех переменных в неизвестных степенях x, y, z .

Получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Pi = \frac{D_b}{d^x \rho_w^y Q^z} \\ \Pi_1 = \frac{\rho_a}{d^{x_1} \rho_w^{y_1} Q^{z_1}} \\ \Pi_2 = \frac{g}{d^{x_2} \rho_w^{y_2} Q^{z_2}} \\ \Pi_3 = \frac{\sigma}{d^{x_3} \rho_w^{y_3} Q^{z_3}} \end{array} \right. \quad (3.9)$$

Найдем показатели степеней из условия безразмерности комплексов.

$$\Pi: L^1 = L^{x-3y+3z} M^y T^{-z}$$

$$\Pi_1: L^{-3} M^1 = L^{x_1-3y_1+3z_1} M^{y_1} T^{-z_1}$$

$$\Pi_2: L^1 T^{-2} = L^{x_2-3y_2+3z_2} M^{y_2} T^{-z_2}$$

$$\Pi_3: M^1 T^{-2} = L^{x_3-3y_3+3z_3} M^{y_3} T^{-z_3}$$

(3.10)

Выпишем показатели степени при L:

$$1 = x - 3y + 3z$$

$$-3 = x_1 - 3y_1 + 3z_1$$

$$1 = x_2 - 3y_2 + 3z_2$$

$$0 = x_3 - 3y_3 + 3z_3$$

(3.11)

Показатели степени при M:

$$\begin{aligned}
 0 &= y \\
 1 &= y_1 \\
 0 &= y_2 \\
 1 &= y_3
 \end{aligned}
 \tag{3.12}$$

Показатели степени при T:

$$\begin{aligned}
 0 &= -z \\
 0 &= -z_1 \\
 -2 &= -z_2 \\
 -2 &= -z_3
 \end{aligned}
 \tag{3.13}$$

Решая полученные уравнения, находим все показатели степеней:

$$\begin{aligned}
 x &= 1; \quad y = 0; \quad z = 0; \\
 x_1 &= 0; \quad y_1 = 1; \quad z_1 = 0; \\
 x_2 &= -5; \quad y_2 = 0; \quad z_2 = 2; \\
 x_3 &= 3; \quad y_3 = 1; \quad z_3 = 2;
 \end{aligned}
 \tag{3.14}$$

Тогда можно записать:

$$\frac{D_B}{d} = \varphi \left(\frac{\rho_a}{\rho_w}, \frac{gd^5}{Q^2}, \frac{\sigma}{d^3 \rho_w Q^2} \right) \quad (3.15)$$

Или:

$$D_B = d \varphi \left(\frac{\rho_a}{\rho_w}, \frac{gd^5}{Q^2}, \frac{\sigma}{d^3 \rho_w Q^2} \right) \quad (3.16)$$

Более физичная запись последнего безразмерного комплекса имеет вид:

$$\frac{\sigma}{d^3 (\rho_w - \rho_a) Q^2}$$

Найдем конкретный вид выражения (3.16) с помощью анализа размерностей. Найдем выражение для частоты отрыва пузырей f через объемный расход воздуха Q и силу плавучести $\frac{g(\rho_w - \rho_a)}{\rho_a}$.

$$f = G \left(\frac{g(\rho_w - \rho_a)}{\rho_a}, Q \right) \quad (3.17)$$

Запишем размерности данных величин в системе MLT.

$$[f] = M^0 L^0 T^{-1}$$

$\left[\frac{g(\rho_w - \rho_a)}{\rho_a} \right] = M^0 L^1 T^{-2}$ – плотность воздуха определяет скорость отрыва пузырьков. Чем больше плотность воздуха (больше давление), тем меньше частота.

Будем искать ответ в виде:

$$f = k \times \frac{g(\rho_w - \rho_a)^A}{\rho_a} \times Q^B \quad (3.18)$$

k – безразмерный параметр.

Аналогичная формула выполняется для единиц измерения. Тогда:

$$L^0 T^{-1} = L^{A+3B} T^{-2A-B} \quad (3.19)$$

$$L: 0 = A + 3B$$

$$T: -1 = -2A - B$$

Тогда $A = 3/5$, $C = -1/5$.

Получим:

$$f = k \times \left[\frac{\left(\frac{g(\rho_w - \rho_a)}{\rho_a} \right)^3}{Q} \right]^{1/5} \quad (3.20)$$

Далее найдем выражение, связывающее частоту отрыва, силу плавучести $\frac{g(\rho_w - \rho_a)}{\rho_a}$ и коэффициент поверхностного натяжения σ .

$$D_B = G \left(f, \frac{g(\rho_w - \rho_a)}{\rho_a}, \sigma \right) \quad (3.21)$$

Будем искать ответ в виде:

$$D_B = k \times f^A \times \frac{g(\rho_w - \rho_a)^B}{\rho_a} \times \sigma^C \quad (3.22)$$

Тогда:

$$M: 0 = C \tag{3.23}$$

$$L: 1 = B$$

$$T: 0 = -A - 2B - 2C$$

Получаем: $C = 0, B = 1, A = -2$.

$$D_B = k \frac{g(\rho_w - \rho_a)}{\rho_a \times f^2} \tag{3.24}$$

Из выражения следует, что отрывной диаметр пузыря не зависит от поверхностного натяжения и связан только с частотой и силой плавучести.

В работе [5] и ранее в работе [3] была приведена следующая формула для частоты отрыва пузырей от сопла:

$$f = A \left(\frac{\rho_w \cdot g^3}{\rho_a \cdot Q} \right)^{0,2} \tag{3.25}$$

A – численный коэффициент.

Также приводится формула для определения отрывного диаметра пузыря:

$$D_B = \frac{g}{f_B^2} \left(\frac{C \rho_w}{\pi \rho_a} \right)^{1/3} \tag{3.26}$$

C – числовая константа.

Как можно видеть, в данных выражениях учитывается связь частоты отрыва пузырей от соотношения плотностей тяжелой и легкой фазы и расхода воздуха. В данной работе получены схожие результаты с некоторыми изменениями относительно разности плотностей и степени, в которой берется соотношение.

3.4 Разработка установки для исследования параметров барботажа и постановка лабораторного эксперимента.

Для решения задач, поставленных в данной работе, была собрана лабораторная установка для проведения серии экспериментов.

Установка состоит из бассейна высотой 50 см и высотой столба воды 40 см. На некоторой глубине помещается трубка с соплом, направленным кверху. Через шланг с помощью источника сжатого газа подается воздух, который выходит в воду в виде пузырьков.

Экспериментальные исследования состояли из двух серий экспериментов, отличавшихся своей постановкой.

Первый вариант эксперимента был поставлен для изучения параметров одиночных пузырей. Сжатый воздух подавался в шланг с помощью шприца объемом 25 мл.

Второй вариант постановки эксперимента предназначался для исследования потока пузырьков (при небольших расходах порядка 0,6 л/мин и менее), а также больших объемов воздуха, вдуваемых струей в воду. Воздух подавался с помощью компрессора, кроме того, регистрировался объемный расход при помощи ротаметра, подсоединенного к шлангу.

Схема установки в двух вариантах представлена на рисунках 3.1 и 3.2.

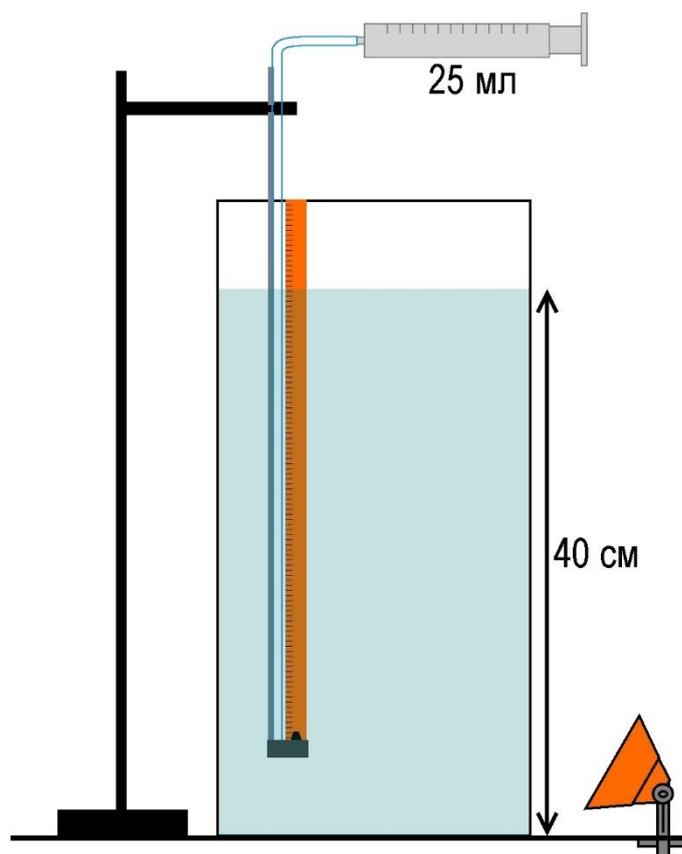


Рисунок 3.1 Схема установки с подачей воздуха с помощью шприца

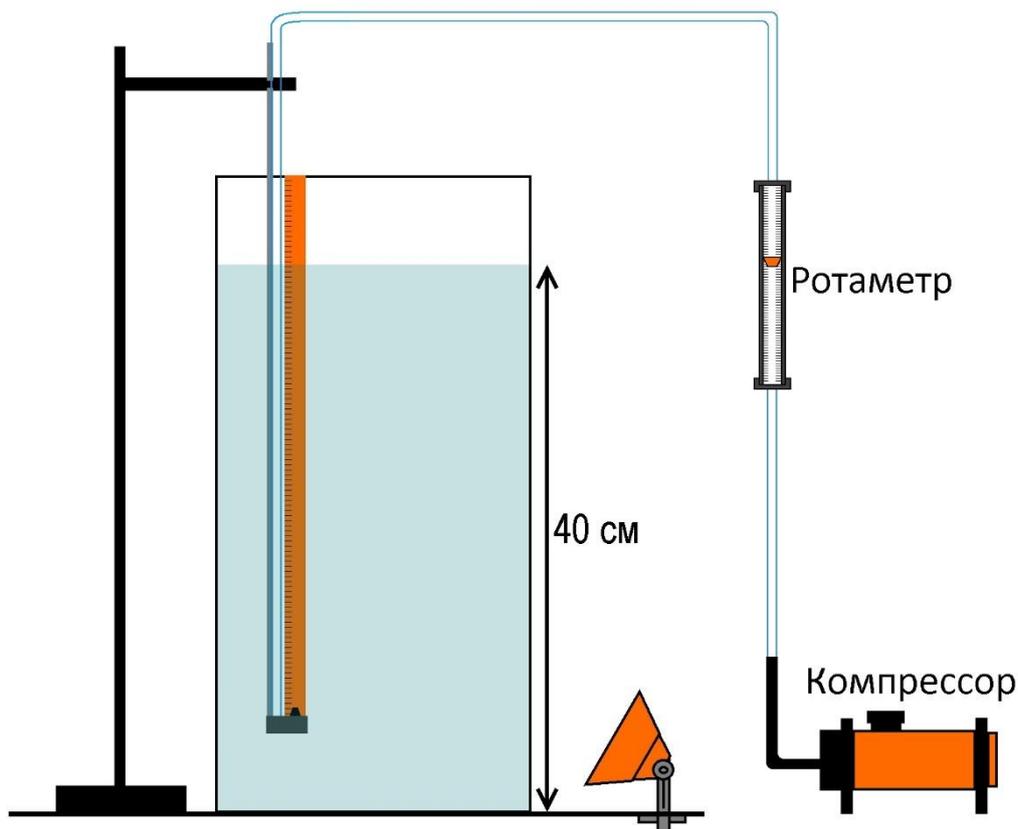


Рисунок 3.2 Схема установки с подачей воздуха через компрессор

Диаметры сопел, использовавшихся в экспериментах, представлены в таблице 3.1

Таблица 3.1 Диаметры сопел в экспериментах

#1	#2	#3	#4
2,6 мм	3,1 мм	3,7 мм	4,3 мм

Всплытие пузырей регистрировалось на видеокамеру с частотой съемки 240 кадров в секунду. При первичной обработке видеоданных для одиночного пузыря определялись диаметр отрыва, а также скорость всплытия. Для потока пузырьков кроме того определялась частота отрыва от сопла, высота факела и скорость его образования.

3.5 Результаты исследования для одиночного пузырька

При первичной обработке видеоданных были определены отрывные диаметры D_B одиночных пузырей и скорости их всплытия w . Длина выборки для сопла № 1 (с диаметром $d = 2,6$ мм) составила 200 пузырей. Для каждого из остальных сопел, используемых в исследовании, были определены параметры 100 пузырей. Также исследованы особенности их отрыва и всплытия.

В ходе экспериментов был детально рассмотрен процесс формирования пузырей на сопле и их отрыва. Фотографии процесса отрыва пузыря представлены на рисунках 3.3-3.4.



Рисунок 3.3 Образование пузырька на сопле и формирование шейки в процессе всплытия.



Рисунок 3.4 Утончение шейки пузыря и его отрыв от сопла.

На рисунках 3.3-3.4 показано, как при малых объемных расходах газа истечение в жидкость через сопло происходит в виде отдельных пузырей. Если скорость истечения мала, то на сопле вначале образуется сфероид, заполненный воздухом, после чего он под действием архимедовой силы и растущего давления внутри него поднимается вверх, и образуется шейка, связывающая его с соплом. При достижении предельного объема шейка разрывается, пузырек отрывается от сопла, и поверхность раздела фаз уменьшается.

В момент отрыва пузырька от сопла его форму можно принять сферической и определить диаметр. Осредненные результаты измерений для различных сопел представлены в таблице 3.2

Таблица 3.1 Диаметр отрыва одиночного пузыря в зависимости от диаметра сопла

Диаметр сопла d , мм	Диаметр отрыва D_B , мм
2,6	5,1
3,1	6,1
3,7	6,7
4,3	7,1

По данным таблицы 3.2 построен график зависимости отрывного диаметра одиночного пузырька от диаметра сопла.

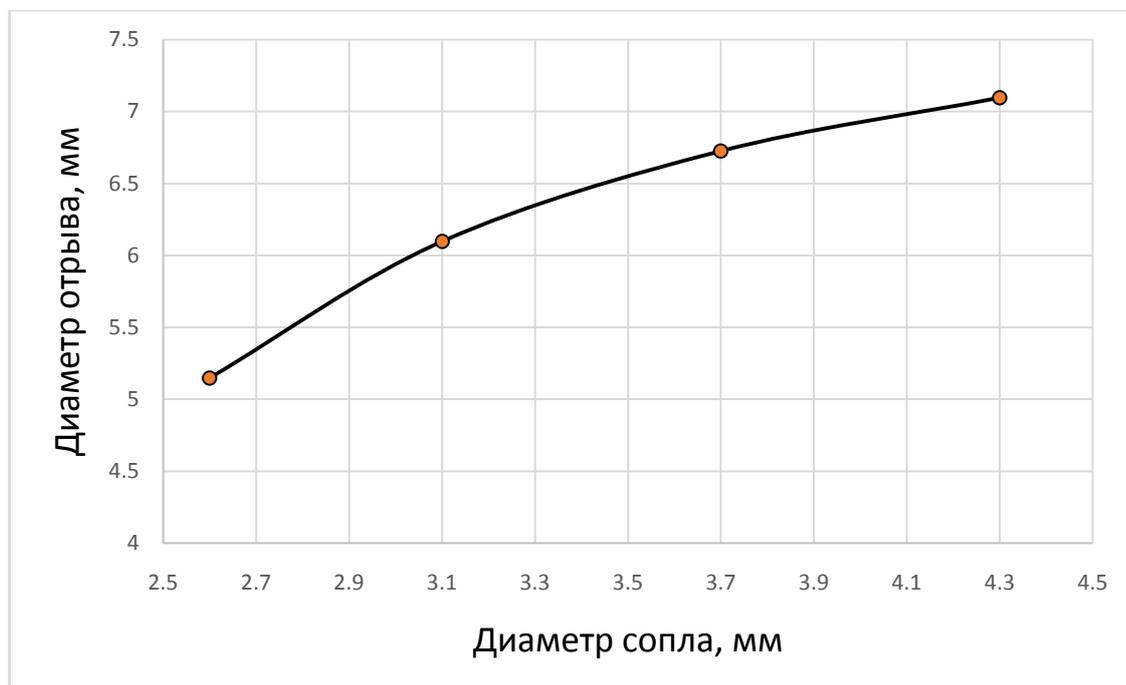


Рисунок 3.5 Кривая зависимости отрывного диаметра одиночного пузырька от диаметра сопла по экспериментальным данным

Из рисунка 3.5 видно, что с увеличением диаметра сопла отрывной диаметр пузыря возрастает. Также можно отметить, что с увеличением диаметра сопла рост диаметра пузыря замедляется. Это может быть связано с достижением критического объема газового пузыря, характерного для данной глубины.

Всплытие пузырей происходит по траектории, отличающейся от прямолинейной и представляющей собой флуктуации относительно оси всплытия. Это связано с тем, что газ внутри пузыря сжимаем и под действием поверхностного натяжения, которое стремится свести к минимуму поверхность раздела фаз, форма пузырька изменяется. Это можно отчетливо наблюдать при движении потока пузырьков, которое будет рассмотрено в следующих разделах. Тем не менее, для одиночных пузырьков, не взаимодействующих

друг с другом, можно определить среднюю скорость всплытия. Осредненные результаты измерений для различных сопел представлены в таблице 3.3.

Таблица 2.3 Скорость всплытия одиночного пузырька в зависимости от его диаметра.

Диаметр отрыва D_B , мм	Скорость всплытия w , см/с
5,1	28,6
6,1	27,4
6,7	26,3
7,1	27,8

По данным таблицы 3.3 построен график зависимости средней скорости всплытия одиночного пузырька от его отрывного диаметра.

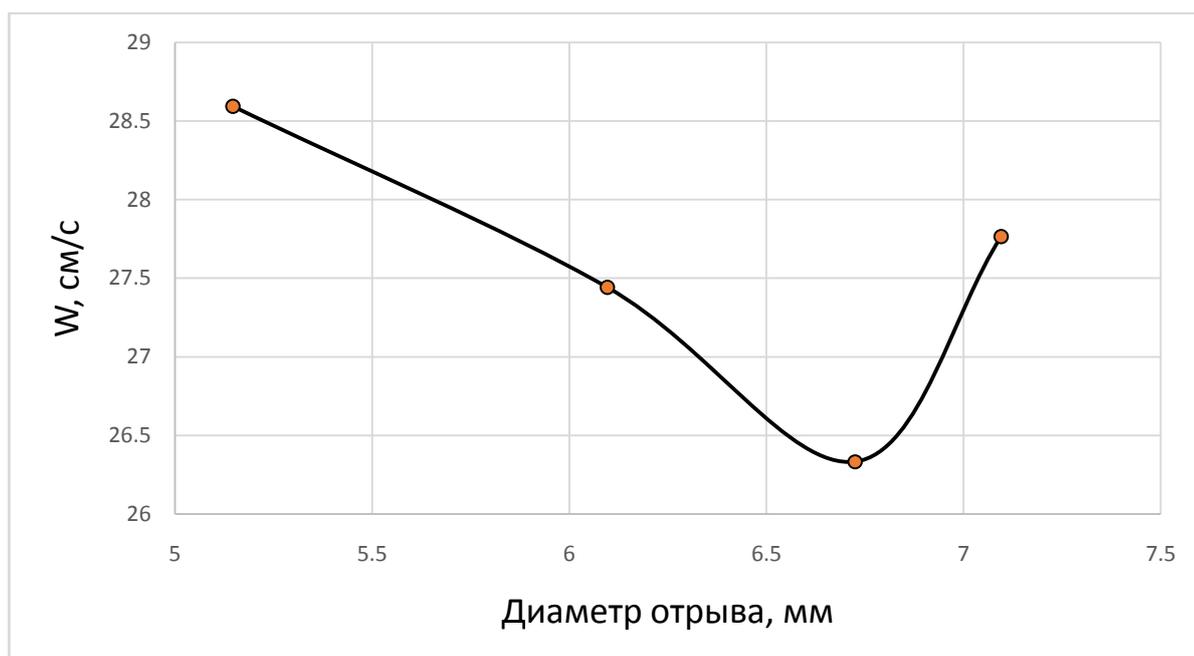


Рисунок 3.6 Кривая зависимости отрывного диаметра одиночного пузырька от диаметра сопла по экспериментальным данным

Из рисунка 3.6 видно, что сначала с увеличением отрывного диаметра пузырька скорость всплытия уменьшается. Это связано с тем, что с деформацией (сплющиванием) пузырей, в следствие чего гидравлическое сопротивление движению возрастает. Затем, при достижении определенного критического

диаметра скорость всплытия начинает увеличиваться, то объясняется увеличением объема и, соответственно, увеличением архимедовой силы. В целом, по величине результаты соответствуют данным Кутателадзе в области перехода от вязкого сопротивления к сопротивлению формы [4].

3.6 Результаты исследования для потока пузырей при расходе воздуха 0,06 – 0,6 л/мин.

Для исследования параметров потока всплывающих пузырей были проведены серии экспериментов, в которых через сопла с диаметрами, приведенными в таблице 1, продувался воздух при расходах 0,06, 0,21, 0,52 и 0,6 л/мин.

Наблюдения показали, что при расходах 0,06 и 0,21 л/мин факел не образуется ни при каких диаметрах сопла. При объемном расходе 0,06 л/мин формирование и всплытие пузырей происходит так же, как и у одиночных. Всплытие пузырей при расходе 0,06 показано на рисунке 3.7.



Рисунок 37 Всплытие пузырьков при расходе воздуха 0,06 л/мин, диаметр сопла 2,6 мм.

На рисунке 3.7 можно видеть, что факела, от которого отрываются пузыри при больших расходах, не образуется. Пузыри всплывают как одиночные, совершая колебания относительно вертикальной оси всплытия. Можно наблюдать также деформацию (сплющивание) пузырей по мере движения.

Процесс образования и всплытия пузырьков при расходе 0,21 также аналогичен одиночным, однако, расстояние между пузырьками уменьшается, а объем увеличивается, из-за чего они испытывают большие деформации.

При увеличении расхода до 0,52 л/мин начинает проявляться взаимодействие пузырьков друг с другом. Рассмотрим формирование пузыря на сопле, его отрыв и всплытие на небольшом расстоянии от сопла. Этот процесс представлен на рисунках 3.8-3.9.



Рисунок 3.8 Образование пузыря. Вслед за ним тут же образуются следующие пузыри. $d = 2,6$ мм.



Рисунок 4 Пузыри, идущие друг за другом через сопло, сливаются и образуется воздушный объем сложной вытянутой формы, который отрывается от сопла и всплывает. $d = 2,6$ мм.

При расходе 0,52 л/мин пузыри образуются непосредственно на сопле, однако, из-за увеличения скорости продувания воздуха, только оторвавшиеся от сопла пузырьки подвергаются воздействию уже формирующихся в этот момент пузырьков на сопле. В результате несколько пузырьков сливаются, а затем уже этот новый объем сложной формы отрывается от сопла и всплывает. Далее в следствие неустойчивости и столкновения с другими всплывающими объемами он может распадаться на более мелкие пузыри, как показано на рисунке 3.10.



Рисунок 5 Всплытие пузырьков при расходе 0,52 л/мин. В верхней части фотографии видно, как большие объемы распадаются на более мелкие. $d = 2.6$ мм

При увеличении расхода до 0,6 л/мин общий характер отрыва пузырьков от сопла и их всплытия не меняется, по сравнению с расходом 0,52 л/мин.

Приведенные выше общие закономерности движения газовой фазы в жидкости справедливы для истечения из всех сопел, применявшихся в исследовании.

Для более подробного исследования характеристик барботажа при различных расходах воздуха были определены диаметры отрыва пузырьков при расходах воздуха 0,06 и 0,21 л/мин, а также частота отрыва пузырей от сопла при расходах от 0,06 до 0,6 л/мин. Измерение диаметров пузырей для расходов более 0,21 л/мин не производилось по причине слияния нескольких пузырей у сопла.

На рисунке 3.11 представлена кривая зависимости диаметра пузырей от диаметра сопла, построенная по осредненным данным при расходах 0,06 и 0,21 л/мин.

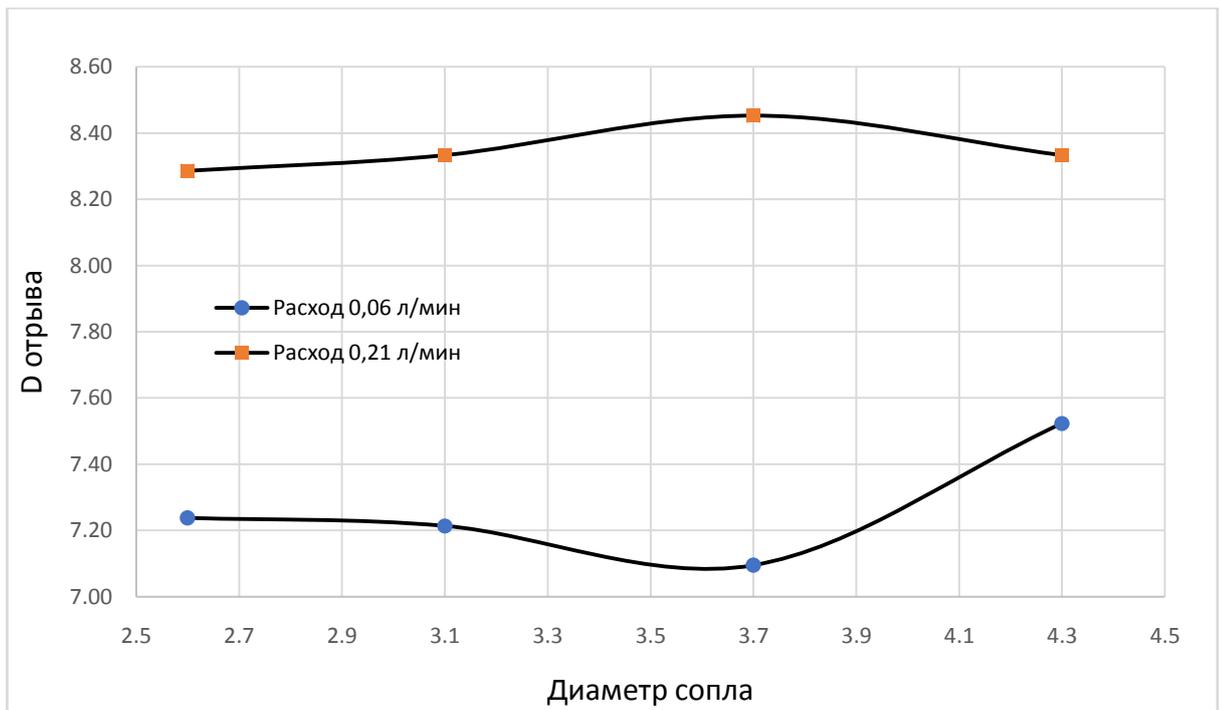


Рисунок 3.11 Зависимость диаметра пузырей от диаметра сопла при расходах 0,06 и 0,21 л/мин.

Из рисунка 3.11 видно, что отрывной диаметр пузырьков в потоке достаточно мало изменяется с увеличением диаметра сопла, однако, с увеличением расхода от 0,06 до 0,21 л/мин возрастает более чем на 10 мм. Возможно, в исследовании использовался недостаточно большой диапазон диаметров сопел, чтобы можно было установить характер их влияния на размер отрывного пузыря. Также это может быть связано с тем, что с увеличением диаметра сопла при постоянном расходе воздуха скорость потока через его сечение снижается, так же, как и снижается интенсивность нарастания внутреннего давления пузыря. Шейка пузырька быстро отрывается от сопла, так как поверхностное натяжение стремится свести поверхность раздела фаз к минимуму, и объем пузыря не успевает достичь больших значений.

По-видимому, значительное влияние на диаметр отрыва пузыря диаметр сопла оказывает только при очень маленьких расходах воздуха.

Методом наименьших квадратов по экспериментальным данным был найден коэффициент k в выражении 3.24. Его значение равно 0,48. Для

формулы 3.26 $C = 0,02$. По формулам произведен расчет диаметров отрыва пузырей в зависимости от расхода. Сопоставление расчетных значений и экспериментальных кривых показано на рисунке 3.12.

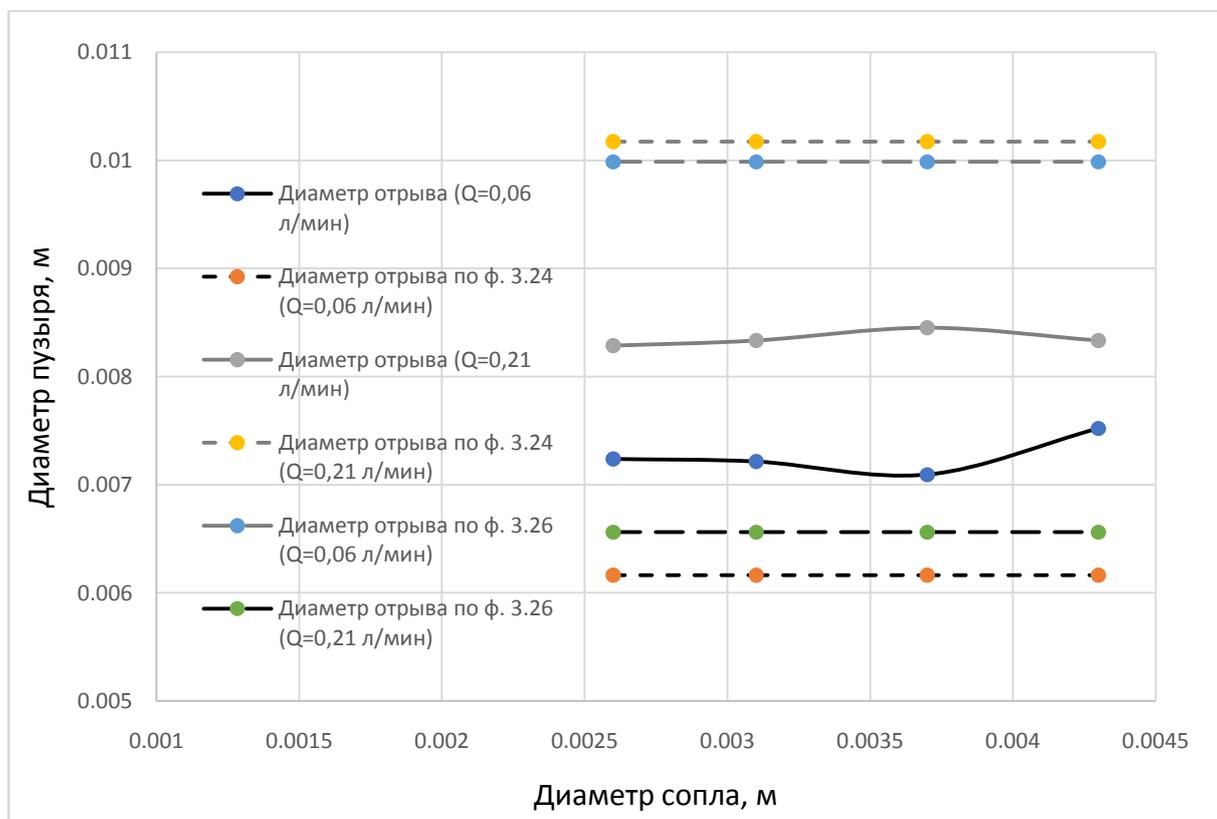


Рисунок 3.12 Сопоставление рассчитанных по ф. 3.24 и 3.26 и экспериментальных диаметров отрыва пузырей

Соотношения для диаметра отрыва пузыря не содержат диаметра сопла, поэтому графики рассчитанных значений D_B представляют собой прямые. Расчет по формуле 3.24 занижает диаметр отрыва при расходе 0,06 л/мин приблизительно на 1 мм, а для расхода 0,21 л/мин завышает значение на 1,5 мм. Расчетные значения по формуле 3.26 ближе к экспериментальным на 0,5 мм для расхода 0,06 л/мин и на 0,1 мм для расхода 0,21 л/мин.

На рисунке 3.13 приведены рассчитанные по формулам 3.24 и 3.26 кривые зависимости диаметра отрыва пузыря от объемного расхода воздуха.

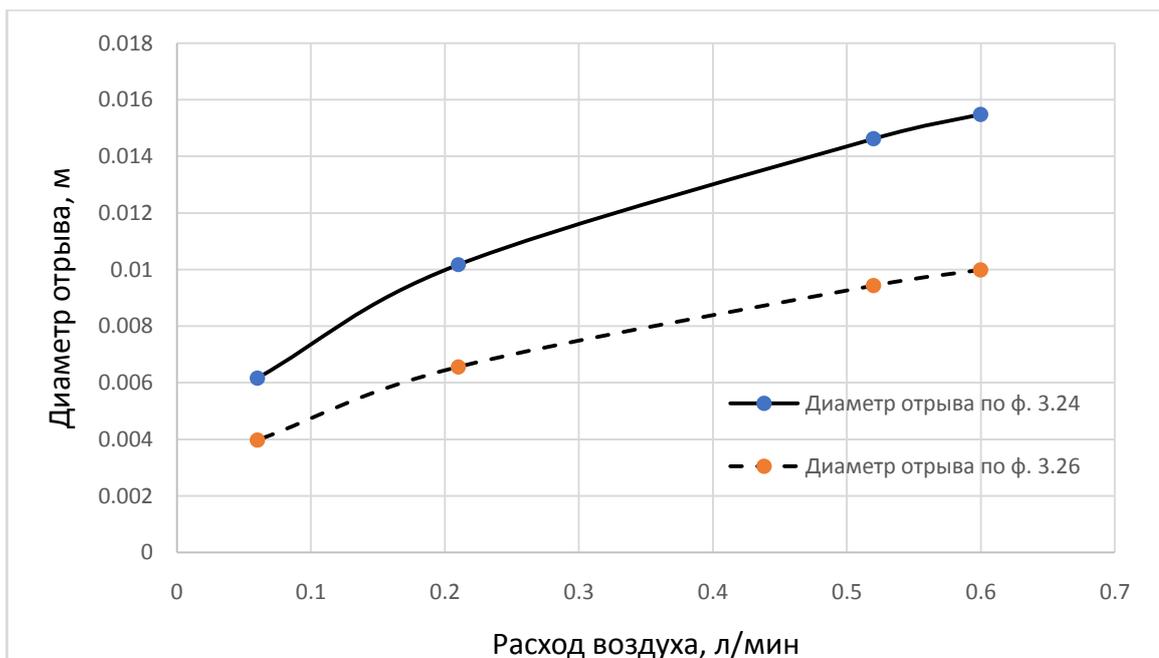


Рисунок 3.13 Сопоставление рассчитанных значений диаметра отрыва пузырей по ф. 3.24 и 3.26

Из рисунка видно, что значения, рассчитанные по ф. 3.26 меньше по величине, чем значения по ф. 3.24, что ближе к реальным значениям, как было показано выше. Кроме того, кривая для ф. 3.26 имеет меньший наклон, и величина диаметра отрыва возрастает медленнее с увеличением расхода. В целом, обе кривые качественно дают один результат: с увеличением объемного расхода воздуха отрывной диаметр пузырьков увеличивается. Следует отметить, что на практике зависимость более сложная в связи с появлением взаимодействия между пузырьками при отрыве от сопла.

Результаты определения частоты отрыва пузырьков в зависимости от объемного расхода представлены в виде графика на рисунке 3.14.

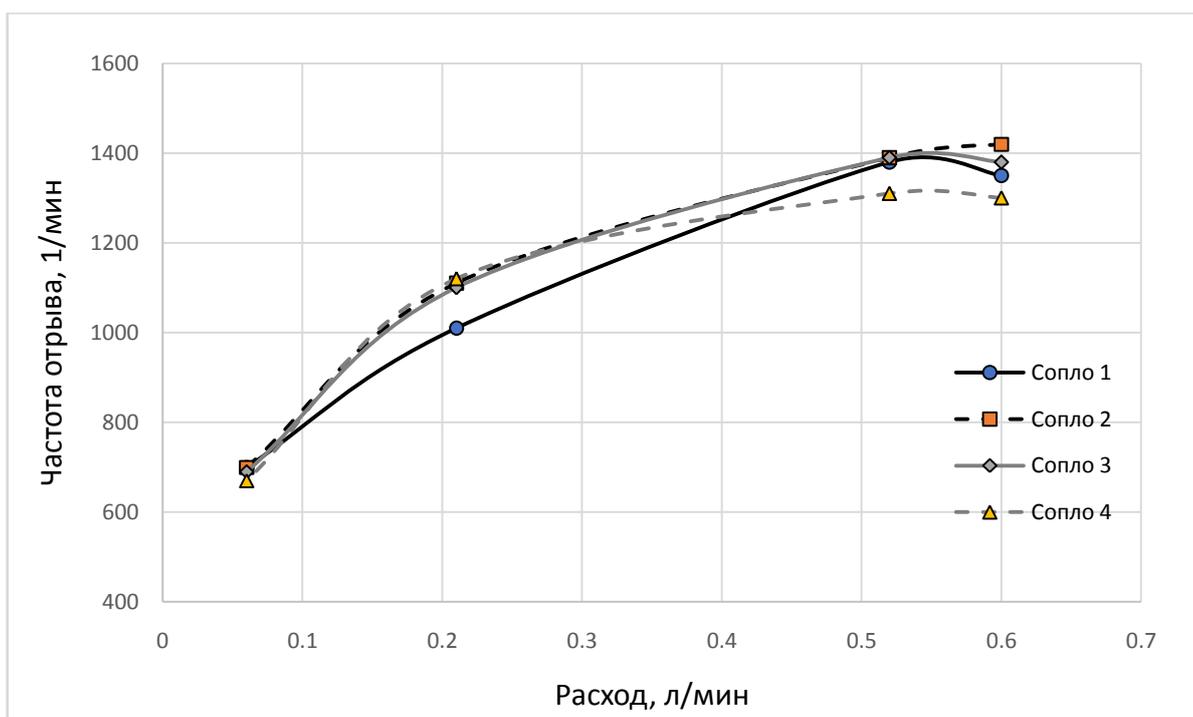


Рисунок 3.14 Частота отрыва пузырьков в зависимости от объемного расхода воздуха

Из рисунка видно, что с увеличением расхода воздуха частота отрыва пузырьков достаточно сильно возрастает от 670 1/мин при расходе 0,06 л/мин и до 1300 и более 1/мин при расходе 0,6 л/мин. При этом видно, что частота отрыва мало изменяется при изменении диаметра сопла. Из этого можно сделать вывод, что частота отрыва в большей степени зависит от объемного расхода воздуха и мало зависит от диаметра сопла. Однако, возможно, в исследовании использовался слишком маленький диапазон диаметров сопел, чтобы повлиять на частоту отрыва, в следствие чего зависимость выявить не удалось.

3.7 Результаты исследования для потоков воздуха при расходах 5 – 12,5 л/мин.

При больших расходах воздуха скорость истечения газа через сопло небольшого диаметра становится значительной. При больших скоростях истечение газа приобретает сложный струйный характер.

На фотографиях, представленных на рисунках 3.15–3.16 показан процесс истечения воздуха в воду через сопло диаметром 2,6 мм при расходе воздуха 5 л/мин.



Рисунок 3.15 Образование факела на сопле. $d = 2,6$ мм.



Рисунок 3.16 Отрыв большого объема от сопла и слияние с образовавшимся факелом.

Как видно из рисунков 3.15 – 3.16 истечение газа при больших скоростях имеет сложный характер. Вначале на сопле образуется факел, который быстро

увеличивается и деформируется, приобретая более округлую форму. Затем от отрывается от сопла, но в это время успевает образоваться следующий факел, который под давлением растет быстрее, чем всплывает сформировавшийся воздушный пузырь, что приводит к их слиянию и образованию высокой струи с относительным внутренним движением. При достижении некоторого критического объема происходит отрыв этого конгломерата от сопла. Можно отметить, что линейные размеры образовавшегося воздушного объема не превышают 25 мм.

На рисунке 3.17 показано распределение газовой фазы в бассейне через сопло диаметром 2,6 мм при расходе воздуха 5 л/мин.



Рисунок 3.17 Распределение газовой фазы в бассейне при расходе 5 л/мин. $d = 2,6$ мм.

На рисунке можно видеть, что после отрыва воздушного конгломерата от сопла из-за неустойчивости и взаимодействия с другими объемами он разбивается на более мелкие части сложной формы и пузырьки с диаметрами 3 – 5 мм и менее.

Были определены параметры струйного истечения воздуха: частота отрыва пузырей и образующихся конгломератов от сопла, а также высота и скорость нарастания факелов.

Результаты измерений высоты факела в зависимости от расхода представлены на рисунке 3.18 в виде кривых для различных сопел.

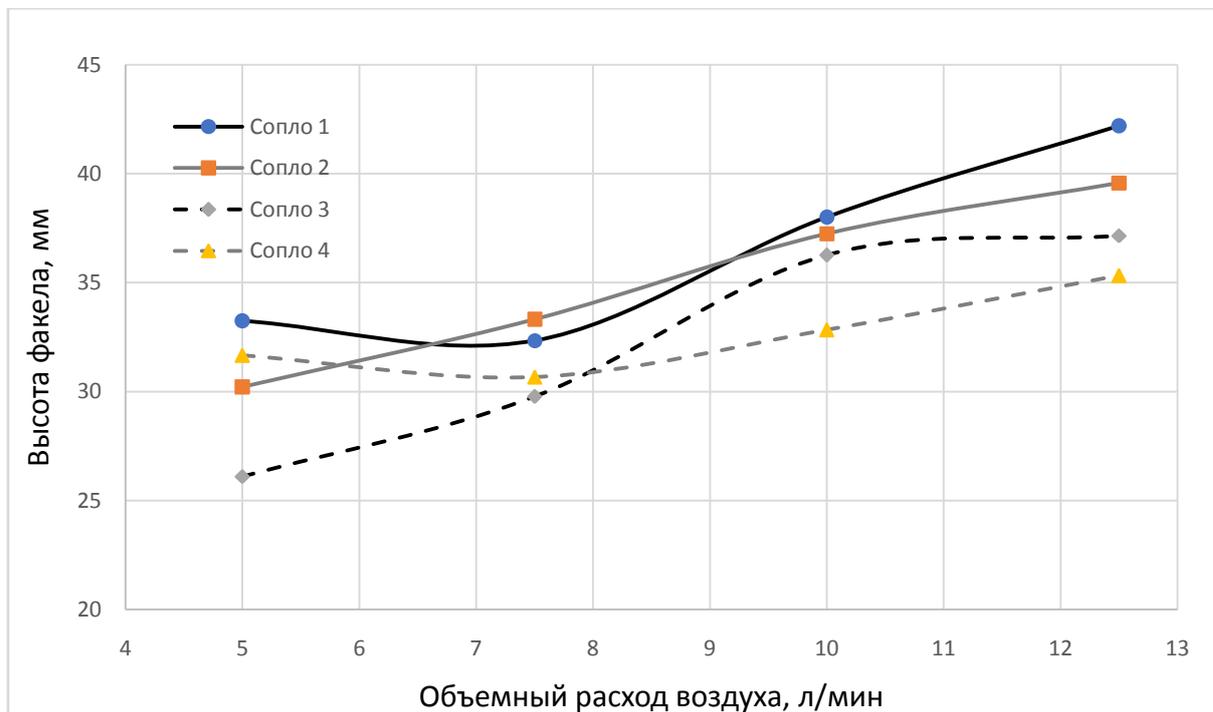


Рисунок 3.18 Зависимость высоты факела от расхода воздуха

На рисунке можно видеть, что, в целом, с увеличением расхода воздуха высота факела увеличивается от 26-33 мм до 35-42 мм. Диаметр сопла влияет на высоту факела сложным образом. С одной стороны, при одном и том же размере сопла с увеличением расхода возрастают скорости потока, и струя воздуха поднимается вверх очень быстро. При этом, ее лобовая часть встречает сопротивление воды, а кормовая ускоряется относительно нее, в следствие чего происходит быстрый отрыв, и факел, таким образом, не достигает большой высоты. В достаточно узком сопле, однако, напор струи при больших расходах настолько велик, что факел достигает максимальной высоты без преждевременного отрыва от сопла, как это видно из кривой для сопла № 1 с диаметром 2,6 мм. При объемном расходе 12,5 л/мин высота факела достигает 42 см. С другой стороны, при одном и том же расходе воздуха с увеличением диаметра сопла происходит снижение скорости потока через его поперечное сечение, объем нарастающего факела возрастает за счет увеличения его

ширины, и достижение предельного объема также происходит без нарастания факела до какой-либо значительной высоты. Этот эффект особенно хорошо отражается на истечении воздуха из сопла № 4 ($d = 4,3$ мм). Для него не наблюдается значительного роста высоты факела с увеличением объема.

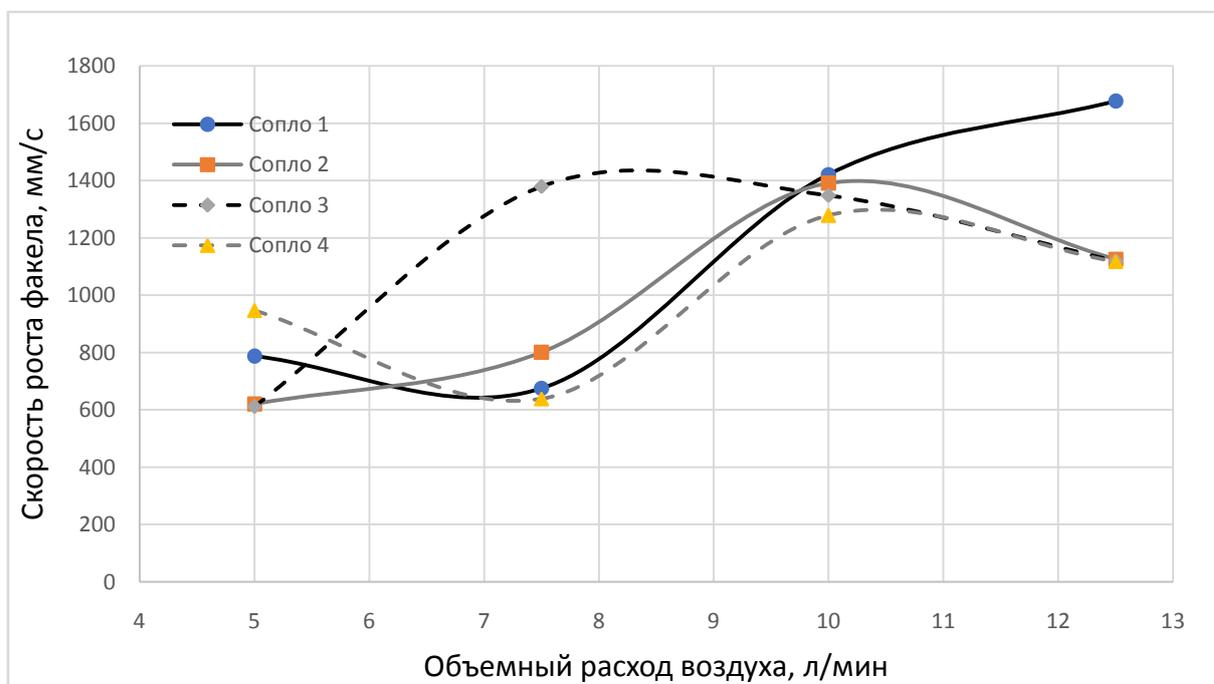


Рисунок 3.19 Зависимость скорости нарастания факела от расхода воздуха

В целом, отмечается тенденция к увеличению скорости роста факела при вдувании воздуха от объемного расхода: скорость возрастает от 610 – 950 мм/с до порядка 1120 мм/с, причем для сопла с диаметром 2,6 мм, т.е. самого узкого, скорость возрастает до 1680 мм/с. В других случаях замедление нарастания факела с увеличением расхода связано с усилением взаимодействия факела со всплывающими воздушными объемами в области их формирования.

Также определена частота отрыва больших объемов воздуха для различных расходов и диаметров сопла. Результаты измерений представлены в виде кривых на рисунке 3.20.

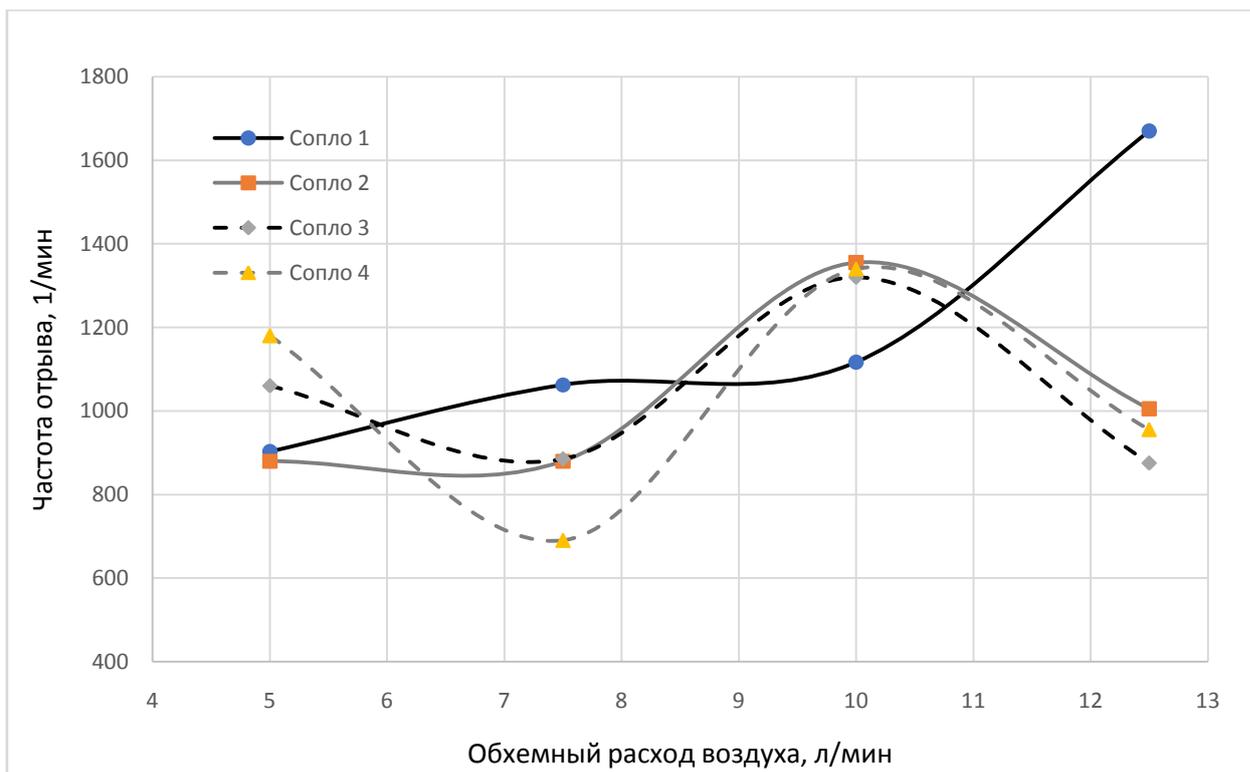


Рисунок 3.20 Зависимость частоты отрыва воздушных объемов от расхода воздуха

Для частоты отрыва больших объемов воздуха нельзя выделить четкой зависимости от расхода воздуха, так как с его увеличением, чаще происходит образование вытянутых конгломератов сложной формы, которые только при достижении некоторого критического объема отрываются от сопла или сами распадаются на более мелкие части. Однако, для частоты отрыва воздушных объемов от сопла № 1 ($d = 2,6$ мм) имеется явная тенденция к увеличению с возрастанием расхода воздуха. Это можно объяснить большей скоростью потока через его поперечное сечение по сравнению с соплами большего диаметра. Несмотря на образование конгломератов, газовая фаза сохраняет значительную часть скорости, развитой на выходе из сопла, и быстро всплывает, практически не препятствуя отрыву от сопла других объемов.

Заключение

В ходе данной работы были выполнены все поставленные задачи. Разработана и собрана экспериментальная установка для исследования параметров барботажа в мелком море. Выполнены серии экспериментов и произведена обработка и анализ полученных данных, на основе чего было сформулировано выражение, описывающее изменение диаметра отрыва пузыря от сопла от различных параметров.

Описан процесс формирования одиночного пузыря на сопле, его отрыв и всплытие. При малых объемных расходах воздуха пузырек отрывается непосредственно от сопла под воздействием растущего давления внутри него и архимедовой силы, что сопровождается разрывом шейки. Всплытие одиночного пузырька имеет характер колебаний относительно вертикальной оси в следствие деформации пузыря из-за сжимаемости газа.

В результате измерений отрывных диаметров одиночных пузырей выявлена прямая связь между ними и диаметром сопла. Также установлено, что скорость всплытия снижается с увеличением диаметра отрыва пузырька в из-за возрастания лобового сопротивления и деформации сфероида, но при достижении некоторого критического объема скорость начинает расти из-за увеличения архимедовой силы.

Приведено описание образования и всплытия пузырей в потоке при расходах воздуха от 0,06 л/мин до 0,6 л/мин. Экспериментально установлено, что при объемном расходе от 0,06 до 0,21 л/мин пузыри в потоке ведут себя как одиночные и не взаимодействуют друг с другом. При увеличении расхода до 0,52 л/мин начинает проявляться взаимодействие пузырей друг с другом, на небольшом расстоянии от сопла они сливаются, образуя конгломераты,

которые в процессе всплытия в следствие неустойчивости распадаются на более мелкие части.

Получено выражение для определения диаметра отрыва пузыря и подобран эмпирический коэффициент. Однако результаты расчетов расходятся с экспериментальными данными на величину порядка 1-1,5 мм, но при этом отражая общую тенденцию к увеличению диаметра отрыва пузырьков с возрастанием объемного расхода воздуха.

При расходах воздуха 5 – 12,5 л/мин режим истечения газа через сопло приобретает струйно-дискретный характер. На сопле образуется факел, высота которого прямо зависит от расхода воздуха, который при достижении предельного объема отрывается от сопла. При этом происходит интенсивное и сложное взаимодействие между всплывающими объемами, они сливаются, образуя конгломераты с относительным внутренним движением. При этом частота отрыва связана с расходом воздуха сложным образом из-за взаимодействия образующейся струи воздуха из сопла с всплывающими конгломератами.

Список литературы

1. Баренблатт Г. И. Подобие, автомодельность, промежуточная асимптоматика. Теория и приложения к геофизической гидродинамике. – Изд. 2-е, перераб. и доп. Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 257 с.
2. Богородский В. В., Гаврило В. П., Недошивин О. А. Разрушение льда. Методы, технические средства. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 232 с.
3. Елисеев В. И., Толстопят А. П., Флеер Л. А. Частота отрыва пузырей от газового прифурменного объема. // ВісникДніпропетровськогоуніверситету. Серія «Механіка». Вип.17, Т.1, 2013
4. Кутателадзе С. С., Стырикович М. А. Гидродинамика газожидкостных систем. – Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: «Энергия», 1976. – 296 с. с ил.
5. Чанцев В. Ю. Анализ вертикального движения воздушно-пузырьковой завесы в воде // Ученые записки РГГМУ №46, 2017, с. 64-70.
6. E. Hulgard, TorbenSerensen, Hostrup-Schultz. Icecoverpreventionbymeansofairbubbles, Nassaq, Greenland. // Portandoceanengineering under Arctic conditions. Technical University of Norway, 2003.
7. Johannes Huffmeier, Jim Sandkvist, Bjorn Forsman. Ice management in Scandinavian ports // Proceedings of the ASME 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. OMAE 2008 June 15-20, 2008, Estoril, Portugal
8. Pan Huachen, EsaEranti. Applicability of Air Bubbler Lines for Ice Control in Harbours // China Ocean Engineering , Vol. 21 , No. 2 , pp. 215 – 224, 2009.
9. Simon Ince. A guide to the design of air bubblers for melting ice. // Hydraulics Section, National Research Council. Ottawa, Canada. - Chapter 39, 2001.